

EVALUASI KINERJA STRUKTUR SAMBUNGAN BALOK-KOLOM PIPIH BETON BERTULANG DENGAN EKSENTRISITAS GEOMETRI: STUDI PEMODELAN NUMERIK

Putu Didik Sulistiana¹, I Ketut Sudarsana², Ida Ayu Made Budiwati²

¹Program Studi Teknik Sipil Universitas Warmadewa, Denpasar, Bali, Indonesia

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia

Email: didik.sulistiana@warmadewa.ac.id

ABSTRAK

Struktur beton bertulang menggunakan kolom dengan penampang pipih (rasio sisi panjang dengan sisi pendek lebih dari 2) umum digunakan di Bali untuk villa bertingkat rendah. Penggunaan ini didasarkan pada pertimbangan arsitektur agar kolom rata dengan tembok (tebal sekitar 150 mm). Kondisi ini menjadi kompleks pada pertemuan balok-kolom tepi dimana eksentrisitas balok terhadap kolom mempengaruhi respon sambungan. Penelitian ini menggunakan program elemen hingga (ABAQUS) untuk meneliti respon pertemuan balok-kolom penampang pipih eksentris akibat beban gempa. Tiga model pertemuan balok kolom tepi beton bertulang dengan eksentrisitas 0, 25, dan 50 mm dibebani beban lateral paralel dengan balok tepi. Model dirancang memenuhi SNI 2847:2013 untuk Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus, kecuali lebar kolom yang lebih kecil dari persyaratan. Kemampuan program divalidasi menggunakan hasil eksperimen dari literatur. Sambungan yang ditinjau memiliki panjang balok dan kolom setengah bentangan. Hasil menunjukkan eksentrisitas balok terhadap kolom signifikan mempengaruhi kekuatan geser sambungan. Defleksi besar terjadi pada kolom ke arah samping akibat kekakuan rendah dan eksentrisitas, menghambat pembentukan sendi plastis pada ujung balok. Leleh tulangan dan kerusakan beton pada sambungan cenderung terjadi lebih awal pada sisi sambungan searah pergeseran titik berat balok. Temuan ini mengindikasikan penggunaan kolom penampang pipih dengan eksentrisitas dapat mengurangi kinerja seismik struktur.

Kata kunci: *analisis elemen hingga, kolom pipih, sambungan balok-kolom eksentris*

PERFORMANCE EVALUATION OF REINFORCED CONCRETE BEAM-THIN COLUMN JOINTS STRUCTURES WITH GEOMETRIC ECCENTRICITY: A NUMERICAL MODELING STUDY

ABSTRACT

Reinforced concrete structures utilizing flat-section columns (with a long-to-short side ratio exceeding 2) are prevalent in low-rise villas in Bali. This architectural preference, aimed at achieving flush column-wall interfaces (approximately 150 mm thick), introduces complexities at beam-column edge joints where beam eccentricity relative to the column significantly influences joint response under seismic loading. This study employs finite element analysis software (ABAQUS) to investigate the seismic response of eccentric flat-section beam-column joints. Three reinforced concrete beam-column edge joint models, with eccentricities of 0, 0.25, and 50 mm, were subjected to lateral loads parallel to the edge beam. The models were designed in accordance with SNI 2847:2013 for Special Moment Resisting Frame Systems, with the exception of undersized column widths. The numerical model was validated against experimental data from existing literature. The joint under investigation has beam and column lengths of half-span. Results demonstrate that beam eccentricity significantly affects joint shear strength. Substantial lateral deflections were observed in the columns due to reduced stiffness and eccentricity, impeding plastic hinge formation at beam ends. Reinforcement yielding and concrete degradation in the joint exhibited a tendency to initiate earlier on the side corresponding to the shift in the beam's center of gravity. These findings indicate that the implementation of flat-section columns with eccentricity may compromise the seismic performance of structures. This research contributes to the understanding of joint behavior in non-standard column configurations and has implications for seismic design practices in regions prone to earthquakes.

Keywords: *finite element analysis, thin column, eccentric beam-column joint*

1. PENDAHULUAN

Pertemuan balok-kolom merupakan bagian yang sangat penting dari struktur rangka pemikul momen, karena pada daerah tersebut merupakan tempat terjadinya interaksi tegangan dari balok dan kolom. Kerusakan pada daerah pertemuan balok-kolom akibat beban gempa dapat berupa peningkatan deformasi serta retak lentur yang diikuti lelehnya baja tulangan.

Sejak tahun 1960, sejumlah penelitian eksperimen terhadap kinerja pertemuan balok-kolom beton bertulang dalam memikul beban gempa telah dipelajari secara menyeluruh. Sebagian besar dari penelitian tersebut mempelajari pertemuan balok-kolom konsentrik terkekang pada keempat sisi kolom oleh balok. Penelitian mengenai pertemuan balok-kolom eksentris telah dilakukan oleh Stehle et al (2001), Shin dan LaFave (2004), Lee dan Ko (2007), Quintero-Febres dan Wight (2001), Hegger et al. (2004), LaFave et al. (2005), Kusuhara et al. (2004). Penelitian-penelitian tersebut merupakan pengujian pertemuan balok-kolom eksentris dengan bentuk kolom bujur sangkar untuk mengetahui kekuatan, daktilitas dan perilaku tegangan yang terjadi pada pertemuan balok-kolom. Hasil penelitian secara umum menunjukkan bahwa perilaku sambungan cukup baik dalam menerima beban gempa.

Dalam praktek, sering dijumpai pertemuan balok-kolom dengan kondisi kolom berpenampang pipih, dimana rasio sisi pendek dengan sisi panjang kolom kurang dari 0,3 sehingga lebar balok dalam arah beban gempa yang ditinjau lebih besar dari lebar kolom. Untuk mengetahui pengaruh eksentrisitas pada pertemuan balok-kolom berpenampang pipih terhadap hubungan beban-deformasi dan pola retak, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk memahami kekuatan kolom berpenampang pipih sehingga dapat mengembangkan metode untuk mengurangi kerusakan akibat beban gempa. Penelitian eksperimen akan memerlukan biaya yang sangat besar untuk meneliti beberapa parameter, namun dengan perkembangan teknologi informasi dan pemodelan, maka penelitian secara numerik berdasarkan metode elemen hingga dapat dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari beberapa parameter dalam suatu penelitian selama dapat ditunjukkan melalui suatu validasi bahwa pemodelan yang dilakukan mampu memberikan hasil yang konsisten dengan hasil eksperimen.

Penelitian untuk mengetahui pengaruh eksentrisitas pada pertemuan balok-kolom dengan kolom berpenampang pipih ini akan dilakukan secara numerik menggunakan program ABAQUS berbasis elemen hingga. Tipe pertemuan balok-kolom tepi (eksterior) dipilih untuk memaksimalkan perilaku pertemuan balok-kolom akibat adanya variasi eksentrisitas geometri.

2. PROGRAM BERBASIS ELEMEN HINGGA (ABAQUS)

ABAQUS merupakan sebuah perangkat lunak analisis elemen hingga yang menyediakan platform komprehensif untuk memodelkan dan mensimulasikan perilaku struktur yang kompleks (ABAQUS Manual, 2016). Elemen *solid* 3D dengan 8 simpul (C3D8) dipergunakan untuk beton normal dan elemen *truss* 3D dengan 2 simpul (T3D2) digunakan untuk memodel baja tulangan.

2.1 Elemen Solid C3D8

Dalam mendefinisikan material beton pada program ABAQUS elemen *solid* C3D8 yang sering digunakan pada beton normal untuk mereduksi integrasi yang sesuai dengan analisis nonlinier. Elemen C3D8 memiliki delapan nodal di setiap sudut. Elemen C3D8 menggunakan interpolasi linear di setiap arah dan sering disebut elemen linear atau elemen orde pertama. C3D8 memiliki tingkat keakuratan yang lebih dan memiliki *mesh* orientasi baik (Thanukumari, B., 2009).

2.2 Elemen Truss T3D2

Difinisi material baja tulangan pada program ABAQUS elemen *truss* T3D2 yang sering digunakan, dimana mempunyai perpindahan interpolasi linear dan tegangan konstan (Thanukumari, B., 2009). Elemen T3D2 memiliki dua derajat kebebasan dan sering digunakan untuk modelling 2D dan 3D.

2.3 Elemen tertanam (Embedded Element)

Teknik memodel dalam program ABAQUS untuk menentukan bahwa elemen atau kelompok elemen yang tertanam dalam elemen terbungkus memakai metode *embedded element*. Teknik ini diterapkan pada model terselengkapnya baja tulangan pada beton. Teknik modelling ABAQUS mempunyai teori hubungan geometris antara node elemen tertanam dan elemen pembungkus. Jika nodal elemen tertanam terletak dalam elemen pembungkus, derajat translasi kebebasan pada nodal elemen dieliminasi dan nodal menjadi "nodal tertanam". Derajat translasi kebebasan nodal tertanam dibatasi dengan nilai-nilai interpolasi dari derajat kebebasan elemen pembungkus. Elemen tertanam diperbolehkan untuk memiliki derajat rotasi kebebasan, tapi rotasi ini tidak dibatasi oleh *embedding* (Thanukumari, B., 2006).

2.4 Mesh

Metode *mesh* pada program ABAQUS tergantung dari sensitifitas *mesh* yang digunakan. Sensitifitas *mesh* yang sering mendekati nilai eksperimen yaitu ukuran tidak kurang dari ukuran kerikil yang digunakan. Sensitifitas *mesh* ditentukan saat melakukan kalibrasi dan disesuaikan dengan *characteristic length* l_0 , yang menjadi dasar dalam menentukan ukuran *mesh*. Ukuran *mesh* yang ditentukan dengan *characteristic length* l_0 dan regulasi viskoplastis, yang mana pengamatan terhadap perambatan retak yang bersamaan dengan beban dan deformasi dapat dilakukan berdasarkan ukuran *mesh* tersebut. Ukuran *mesh* sebaiknya tidak sama atau lebih kecil dari ukuran agregat yang digunakan. Pada model kalibrasi, ukuran agregat maksimum yang digunakan adalah 10mm. Hasil numerik menunjukkan bahwa perilaku model dengan pendekatan elemen hingga (*Finite Element*) menggunakan program Abaqus sesuai dengan hasil eksperimen. Keakuratan hasil analisis dengan pemodelan dapat memprediksi tegangan, deformasi, kapasitas drift, disipasi energi, dan pola retak.

2.5 Metode Concrete Damage Plasticity (CDP)

Metode *concrete damage plasticity* digunakan dalam memodelkan perilaku plastis beton. Metode ini berkesinambungan, berbasis plastisitas, model keruntuhan, yang mengasumsikan mekanisme kegagalan utama dari beton yaitu retak tarik dan tekan. Metode ini menggunakan mekanisme leleh dengan persamaan modifikasi oleh Lee & Fenves, 1998, dari persamaan oleh Lubliner, sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha \bar{p} + \beta(\bar{\epsilon}^{\sim pl}) (\bar{\sigma}_{\max}) - \gamma(-\bar{\sigma}_{\max})) - \bar{\sigma}_c(\bar{\epsilon}_c^{\sim pl}) \quad (1)$$

Bentuk permukaan beban pada bidang deviatory ditentukan oleh γ , dengan α merupakan parameter perbandingan kuat tekan dua arah (σ_{b0}) dengan kuat tekan satu arah (σ_{c0}) yang dihitung berdasarkan kurva Kupfer's, persamaan α adalah sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right) - 1}{2\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right) - 1} \quad (2)$$

Parameter γ akan aktif ketika *principal stress* maksimum bernilai negatif.

$$\gamma = \frac{3(1 - K_1)}{2K_c - 1} \quad (3)$$

Bidang $p - q$ pada Gambar 1 menggambarkan fungsi leleh, dimana \bar{p} adalah tegangan tensor (tegangan tekanan hidrostatik) dan \bar{q} adalah tegangan efektif *Mises* ekuivalen, seperti ditampilkan pada persamaan (4) dan (5).

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \bar{\sigma} I_1 \quad (4)$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{S} : \bar{S})} \quad (5)$$

I_1 dan \bar{S} adalah invarian pertama dari tegangan *tensor* dan tegangan efektif *deviatoric*, yang didefinisikan sebagai berikut:

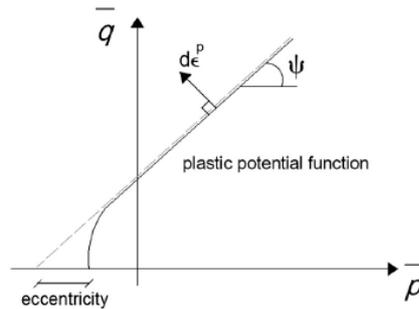
$$I_1 = \text{trace}(\bar{\sigma}) \quad (6)$$

$$\bar{S} = \bar{\sigma} + \bar{p}I \quad (7)$$

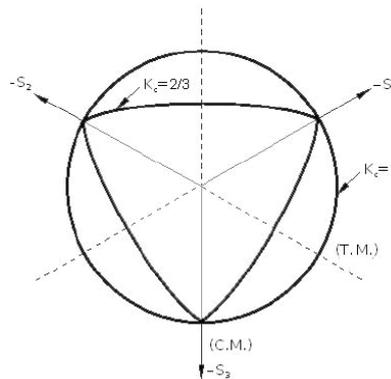
Fungsi $\beta(\bar{\epsilon}^{\sim pl})$ didefinisikan seperti persamaan (8)

$$\beta\left(\bar{\epsilon}^{\sim pl}\right) = \frac{\bar{\sigma}_c\left(\bar{\epsilon}_c^{\sim pl}\right)}{\bar{\sigma}_t\left(\bar{\epsilon}_t^{\sim pl}\right)} (1-\alpha) - (1+\alpha) \quad (8)$$

$\bar{\sigma}_c\left(\bar{\epsilon}_c^{\sim pl}\right)$ dan $\bar{\sigma}_t\left(\bar{\epsilon}_t^{\sim pl}\right)$ merupakan tegangan tekan efektif dan tegangan kohesi tarik.



Gambar 1. Sudut dilatasi dan eksentrisitas pada bidang meridian
Sumber: Genikomsou & Polak, 2014 dan 2015



Gambar 2 Permukaan potensial plastis $K_c = 1$ dan $K_c = 2/3$ pada bidang deviatory
Sumber: Genikomsou & Polak, 2014 dan 2015

Pada Gambar 2, K_c adalah ratio tarik dengan tekan pada garis meridian yang menggambarkan bentuk dari leleh permukaan pada bidang deviatory. $K_c = 2/3$ sesuai persamaan Rankine dan $K_c = 1$ untuk kriteria Drucker-Prager, dimana K_c seharusnya didefinisikan berdasarkan tes pada beton secara tiga arah, tetapi tes dua arah dapat digunakan untuk mendapatkan nilai $\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$. Pada studi ini nilai K_c menggunakan nilai $2/3 = 0,667$. Nilai ini setara dengan kriteria kekuatan yang diformulasikan oleh William dan Warnke (kombinasi dari tiga tangen eliptikal) yang berdasarkan hasil test triaksial (Kmieciak & Kaminski, 2011). Fungsi potensial aliran (*flow potential function*), $G(\sigma)$ merupakan fungsi yang digunakan dalam *concrete damage plasticity model*, dengan persamaan sebagai berikut:

$$G(\sigma) = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{i0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (9)$$

Parameter ε , adalah eksentrisitas yang merupakan nilai pendekatan asymptote dari fungsi potensial plastis dan σ_{i0} adalah tegangan uniaksial. Sudut dilatasi (*dilatation angle*), ψ pada persamaan (9), diukur pada bidang $p - q$ pada tekanan kekangan tinggi. Dari hasil beberapa peninjauan terhadap nilai eksentrisitas pada metode ini adalah $\varepsilon = 1$. Ketika $\varepsilon = 0$, permukaan dari bidang meridian menjadi garis lurus seperti pada Gambar 1. Tegangan efektif untuk beban satu arah ditentukan sebagai berikut:

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} = (1-d)E_0(\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (10)$$

Kerusakan beton, d , mendefinisikan kerusakan berjangka dari kerusakan tekan dan tarik, d_c dan d_t , sebagai berikut:

$$(1-d) = (1-s_t d_c)(1-s_c d_t) \quad (11)$$

dengan s_c dan s_t merupakan fungsi yang menentukan *stiffnes recovery* dari tarik dan tekan dengan persamaan:

$$s_t = 1 - w_c(1-r(\sigma)) \quad (12)$$

$$s_c = 1 - w_t r(\sigma) \quad (13)$$

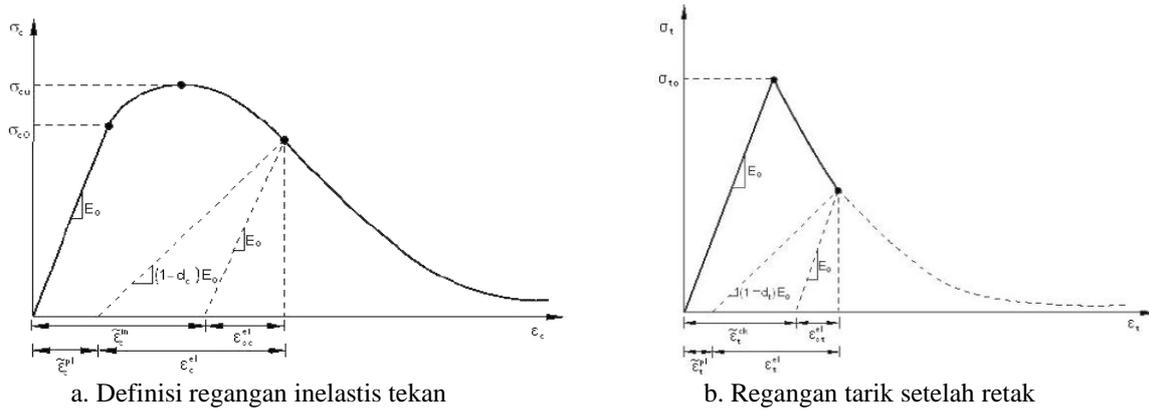
Parameter w_c dan w_t adalah faktor berat yang menentukan *recovery* kekakuan dari tekan dan tarik, dan $r(\sigma)$ adalah arah berat yang ditunjuk pada tegangan principal (*principal stresses*). Metode keruntuhan plastis

beton ini disediakan dengan *viscoplastic regulation* dari pendekatan general Devaut-Lions. Parameter viskositas, μ , memperbaharui regangan tensor plastis dan parameter *damage* berasal dari relaksasi waktu tambahan. Nilai regangan viskoplastis dan peningkatan kerusakan viskoplastis berturut-turut ditentukan dengan:

$$\dot{\epsilon}_v^{pl} = \frac{1}{\mu}(\epsilon^{pl} - \epsilon_v^{pl}) \tag{14}$$

$$\dot{d}_v = \frac{1}{\mu}(d - d_v) \tag{15}$$

dengan d_v menandakan variabel dari penurunan kekakuan viskositas.



Gambar 3. Definisi regangan inelastis tekan, dan regangan tarik setelah retak

Sumber: Genikomsou & Polak, 2014 dan 2015

Diagram pada Gambar 3 dapat digunakan dalam menentukan tegangan-regangan tarik retak ($\tilde{\epsilon}_t^{ck}$) dan tegangan-regangan tekan hancur ($\tilde{\epsilon}_c^{in}$) yang dibebani uniaksial. Hubungan regangan retak dan hancur dengan regangan plastis ($\tilde{\epsilon}^{pl}$) dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\tilde{\epsilon}_c^{pl} = \tilde{\epsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \tag{16}$$

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \tag{17}$$

Pada beberapa penelitian menggunakan metode *concrete damage plasticity*, sudut dilatasi ψ , *shape factor* K_c , rasio tegangan $\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$, dan eksentrisitas ϵ selalu dipertimbangkan. Nilai masing-masing parameter adalah sudut dilatasi ψ diambil berkisar antara 30° a/d 40° , eksentrisitas $\epsilon = 0.1$, $K_c = 0.67$, dan rasio tegangan $\sigma_{b0} / \sigma_{c0} = 1.16$ yang merupakan nilai terbaik dari hasil beberapa penelitian.

3. MATERIAL DAN METODE

3.1. Material Beton

Mutu beton yang digunakan $f'c = 30$ MPa, dengan properti material beton yang di input pada program ABAQUS seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Material beton

Type	Karakteristik Material	
Elemen <i>solid</i> 3D (C3D8)	<i>Modulus of elasticity</i>	25,742.96
	<i>Poisson ratio</i>	0.2
	<i>Density</i>	2.35631×10^{-9}

Adapun propeti CDP yang di input dalam program ABAQUS terlihat pada

Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Properti *concrete damaged plasticity* (CDP)

Tipe	Material Propertis	
Plasticity	<i>Dilation Angle</i>	30
	<i>Eccentricity</i>	0.1
	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	1.16
	<i>K</i>	0.667
	<i>Viscosity Parameter</i>	0.00005
Tensile Behavior	<i>Yield Stress</i>	2.1
	<i>Fracture Energy</i>	0.083

Tabel 3. Properti *compressive behavior*

Yield Stress	Inelastic Strain
1	0
5	0.003750
10	0.005250
15	0.007500
20	0.008750
25	0.011250
30	0.011875
32	0.013125

3.2 Material baja tulangan

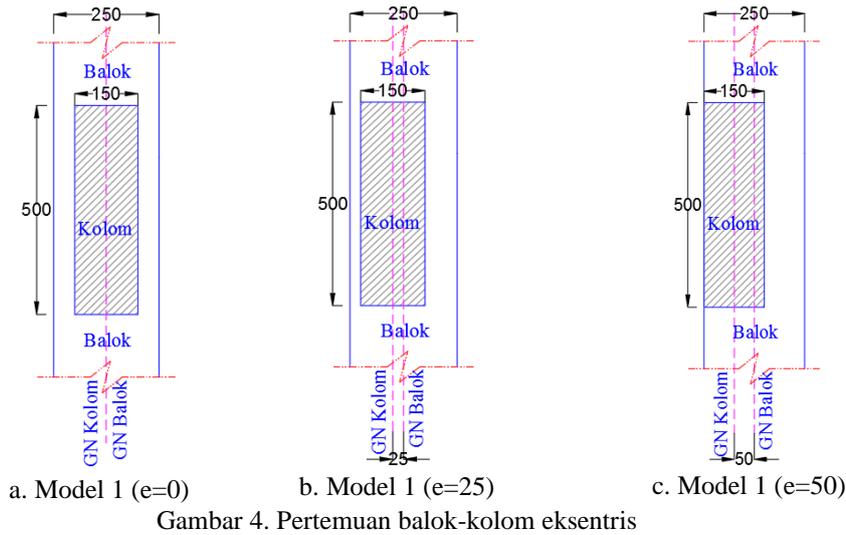
Mutu baja yang digunakan adalah 430 MPa, dengan propertis baja seperti Tabel 4.

Tabel 4. Material baja tulangan

Tipe	Karakteristik Material	
Elemen <i>Truss</i> (T3D2)	<i>Modulus of elasticity</i>	199947.98
	<i>Poisson ratio</i>	0.3
	<i>Density</i>	7.69729×10^{-9}

3.3 Pemodelan dan Analisis

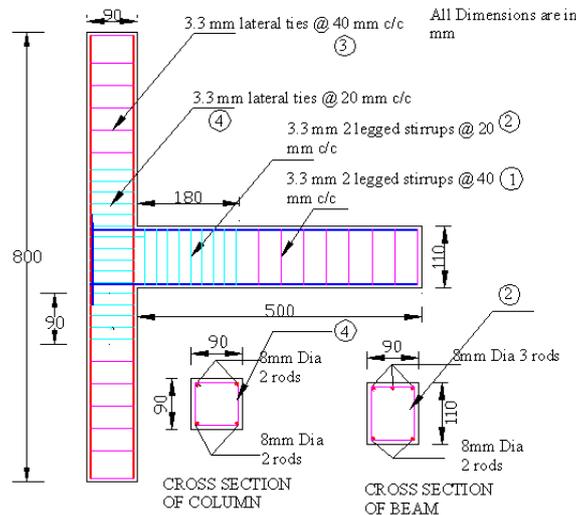
Langkah awal dari penelitian ini adalah melakukan validasi terhadap model dari hasil penelitian eksperimen. Langkah awal penelitian adalah melakukan validasi pemodelan hasil pengujian eksperimen dari salah satu model benda uji pertemuan balok-kolom eksentris yang dilakukan oleh Thanukumari B. (2010) dengan *software* ABAQUS ver.14.6. 2. Hasil analisis numerik dibandingkan dengan hasil uji eksperimen. Apabila hasil analisis sama atau mendekati hasil uji eksperimen, maka analisis selanjutnya dapat digunakan. Setelah mendapatkan hasil validasi yang valid, selanjutnya mendesain dimensi dan penulangannya menggunakan *software* ETABS. Desain dilakukan dengan memodel satu gedung penuh. Proses desain mengacu pada peraturan yang berlaku hingga mendapatkan dimensi dan penulangan. Adanya variasi eksentrisitas balok dan kolom maka desain dimensi dan penulangan yang terbesar yang akan mewakili untuk semua model. Pembebanan diberikan dengan beban horizontal (gempa) yang bekerja sejajar dengan sumbu kuat penampang kolom dan beban vertikal dikerjakan pada ujung balok. Beban tersebut ditingkatkan secara bertahap (*increment*) sampai mencapai beban ultimit atau mengalami keruntuhan. Hasil analisis kemudian dibandingkan satu sama lain untuk mendapatkan perilaku yang terjadi pada pertemuan balok-kolom dengan variasi eksentrisitas yang telah ditentukan. Model yang diteliti pada studi ini merupakan bagian dari pertemuan balok-kolom dengan variasi eksentrisitas. Adapun pemodelan dari ketiga benda uji yang ditinjau menggunakan program ABAQUS dapat dilihat pada Gambar 4.



3.4 Validasi

Langkah pertama variasi dilakukan pada sudut dilatasi (ψ), nilai parameter viskositas (μ) digunakan nilai masih bervariasi seperti sebelumnya, dan nilai parameter lainnya sama seperti sebelumnya. Berdasarkan hasil terbaik dari variasi parameter viskositas dan sudut dilatasi, kemudian dilanjutkan memvariasikan ukuran *mesh*, penggunaan mode keruntuhan, regangan tarik atau fraktur energi, dan ketika variasi nilai parameter yang ditinjau maka nilai parameter yang lainnya bernilai tetap dari hasil yang terbaik pada perlakuan sebelumnya.

Properti material beton yang di input pada program ABAQUS seperti terlihat pada Tabel 2. Hubungan tegangan dan regangan diasumsikan mengikuti model Hognestad (1951), mengingat data eksperimen yang dipakai tidak memiliki hasil pengujian tegangan regangan beton. Gambar 5 menunjukkan model validasi yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 5 Skema dimensi, penulangan balok dan kolom benda uji validasi
Sumber: Thanukumari B. (2010)

Pengkodean model benda uji untuk studi parameter yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 5.

Model	Kode
Model 1 Kosentris (e=0)	I0
Model 1 Eksentris 25 mm (e=25)	I25
Model 1 Eksentris 50 mm (e=50)	I50

4. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Validasi Parameter Concrete Damage Parameter (CDP)

Hasil validasi parameter CDP menunjukkan keberhasilan dalam mengoptimalkan model numerik untuk memprediksi perilaku struktur beton. Setelah melakukan studi terhadap berbagai parameter CDP, nilai-nilai optimal yang memberikan hasil terbaik telah ditetapkan dan digunakan secara bersama-sama dalam pemodelan. Parameter-parameter kunci ini seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

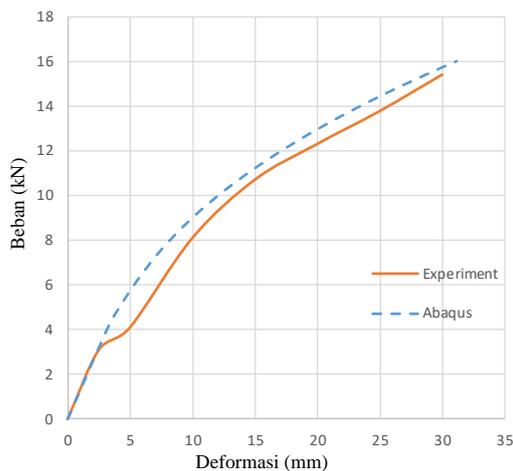
Tabel 6. Properti *concrete damaged plasticity*

Tipe	Karakteristik Material	
Plasticity	<i>Dilation Angle</i>	30
	<i>Eccentricity</i>	0.1
	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	1.16
	<i>K</i>	0.667
	<i>Viscosity Parameter</i>	0.00005
Tensile Behavior	<i>Yield Stress</i>	2.1
	<i>Fracture Energy</i>	0.083

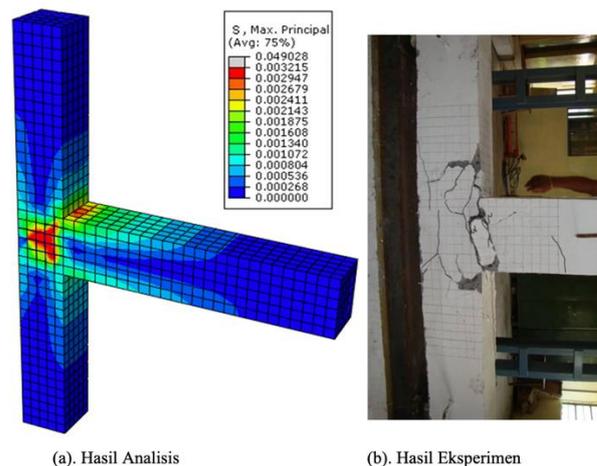
Penggunaan parameter-parameter optimal ini menghasilkan kurva hubungan beban vertikal dengan deformasi pada kolom yang sangat mendekati hasil eksperimen laboratorium. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil analisis pemodelan menggunakan ABAQUS dengan data eksperimen. Perbandingan ini, yang disajikan dalam Tabel 7 dan Gambar 6, menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi. Beban maksimum yang diprediksi oleh model ABAQUS adalah 16,00 kN, hanya berbeda 3,75% dari hasil eksperimen yang mencatat beban 15,40 kN. Demikian pula, deformasi yang diprediksi adalah 31,13 mm, dengan perbedaan hanya 3,64% dari nilai eksperimen 30,00 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa model numerik yang dikembangkan mampu mereproduksi perilaku struktur dengan sangat baik, dengan hasil yang sedikit lebih konservatif, memberikan faktor keamanan dalam prediksi.

Tabel 7. Hasil validasi

	Experiment	Abaqus	Error (%)
Load (kN)	15.40	16.00	3.75
Displacement (mm)	30.00	31.13	3.64



Gambar 6. Grafik beban-deformasi hasil pemodelan vs eksperimen



Gambar 7. Tegangan prinsipal maksimum

Validasi visual juga dilakukan dengan membandingkan pola regangan maksimum yang terjadi pada pertemuan balok-kolom hasil analisis numerik dengan pola retak yang teramati pada saat pengujian eksperimen. Gambar 7 mengilustrasikan kesesuaian yang baik antara hasil analisis dan eksperimen, di mana lokasi dan pola regangan maksimum pada model numerik berkorelasi erat dengan pola retak yang terbentuk pada

spesimen uji. Hal ini semakin memperkuat validitas model dalam merepresentasikan mekanisme kegagalan struktur.

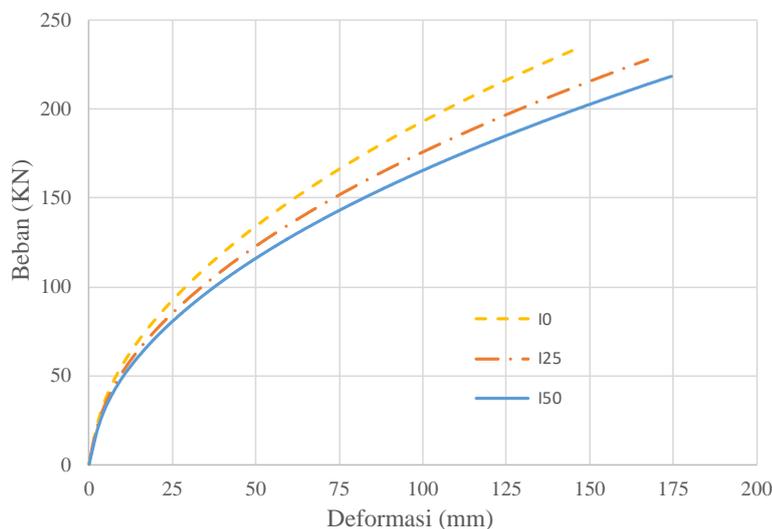
4.2 Hubungan Beban-Deformasi

Tabel 8 menunjukkan hasil analisis hubungan beban-deformasi untuk tiga model pertemuan balok-kolom pipih dengan variasi eksentrisitas beban. Model I0 menunjukkan kapasitas beban tertinggi di antara ketiga model, yaitu 233,82 kN, dengan deformasi maksimum 145,57 mm. Ini mengindikasikan bahwa struktur tanpa eksentrisitas beban memiliki kekuatan yang lebih besar, namun deformasi yang lebih kecil dibandingkan model lainnya. Model I25 mengalami sedikit penurunan kapasitas beban menjadi 227,81 kN, tetapi mengalami peningkatan deformasi maksimum menjadi 167,32 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan eksentrisitas beban menyebabkan struktur menjadi lebih fleksibel, mampu berdeformasi lebih besar sebelum mencapai kapasitas maksimumnya. Model I50 menunjukkan kapasitas beban terendah yaitu 218,70 kN, namun memiliki deformasi maksimum terbesar yaitu 174,28 mm. Ini mengindikasikan bahwa peningkatan eksentrisitas beban lebih lanjut mengakibatkan penurunan kapasitas beban yang lebih signifikan, tetapi juga meningkatkan kemampuan struktur untuk berdeformasi sebelum mencapai kegagalan.

Tabel 8. Hubungan antara beban vs deformasi model analisis

Model	Eksentrisitas	Beban (kN)	Deformasi (mm)
I0	0	233.82	145.57
I25	25	227.81	167.32
I50	50	218.70	174.28

Dari grafik pada Gambar 8, dapat diamati bahwa ketiga model menunjukkan pola perilaku yang serupa, dengan fase elastis linear di awal pembebanan, diikuti oleh fase non-linear saat mendekati kapasitas maksimum. Namun, terlihat bahwa semakin besar eksentrisitas, kurva cenderung lebih landai, menunjukkan peningkatan daktilitas struktur. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan eksentrisitas beban pada hubungan balok-kolom tanpa balok transversal cenderung menurunkan kapasitas beban maksimum, tetapi meningkatkan kemampuan struktur untuk berdeformasi. Hal ini mungkin disebabkan oleh redistribusi tegangan yang terjadi akibat momen tambahan yang dihasilkan oleh beban eksentris, yang pada gilirannya mempengaruhi perilaku global struktur.

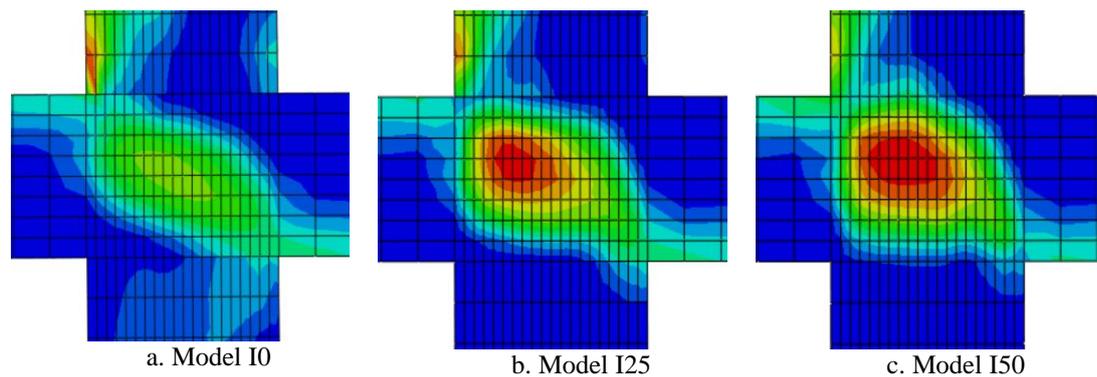


Gambar 8. Grafik perbandingan hubungan beban-deformasi seluruh model

4.3 Regangan dan Pola Retak

Hasil analisis regangan dan pola retak pada ketiga model hubungan balok-kolom pipih menunjukkan perilaku yang beragam seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Ketiga model ini memperlihatkan pola umum di mana retak awal terjadi di daerah tarik kolom, dengan regangan maksimum mencapai nilai 0,002947. Perkembangan retak selanjutnya membentuk pola diagonal pada *joint* tengah dan berkembang secara radial, menunjukkan distribusi tegangan yang khas pada hubungan balok-kolom pipih. Model IE0, dengan eksentrisitas

0, menampilkan perilaku yang simetris antara sisi dekat dan jauh dari kolom. Retak berkembang hingga mencapai ukuran 350 x 230 mm dengan regangan 0,002143. Hal ini menunjukkan distribusi tegangan yang merata akibat beban yang diterapkan tanpa eksentrisitas. Pada model I25, mulai terlihat perbedaan antara sisi dekat dan jauh kolom. Sisi dekat kolom mengalami retak yang lebih besar, mencapai 420 x 310 mm, sementara sisi jauh kolom mengalami retak sebesar 310 x 185 mm. Kedua sisi ini memiliki regangan yang sama yaitu 0,002143. Perbedaan ini mengilustrasikan pengaruh eksentrisitas beban terhadap distribusi tegangan pada struktur. Model I50 menunjukkan perbedaan yang lebih signifikan antara sisi dekat dan jauh kolom. Sisi dekat kolom mengalami retak yang jauh lebih besar, mencapai 480 x 370 mm, sedangkan sisi jauh kolom hanya mengalami retak sebesar 230 x 150 mm. Meskipun ukuran retak berbeda, kedua sisi tetap memiliki regangan yang sama yaitu 0,002143. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan eksentrisitas beban menyebabkan konsentrasi tegangan yang lebih besar pada sisi dekat kolom.



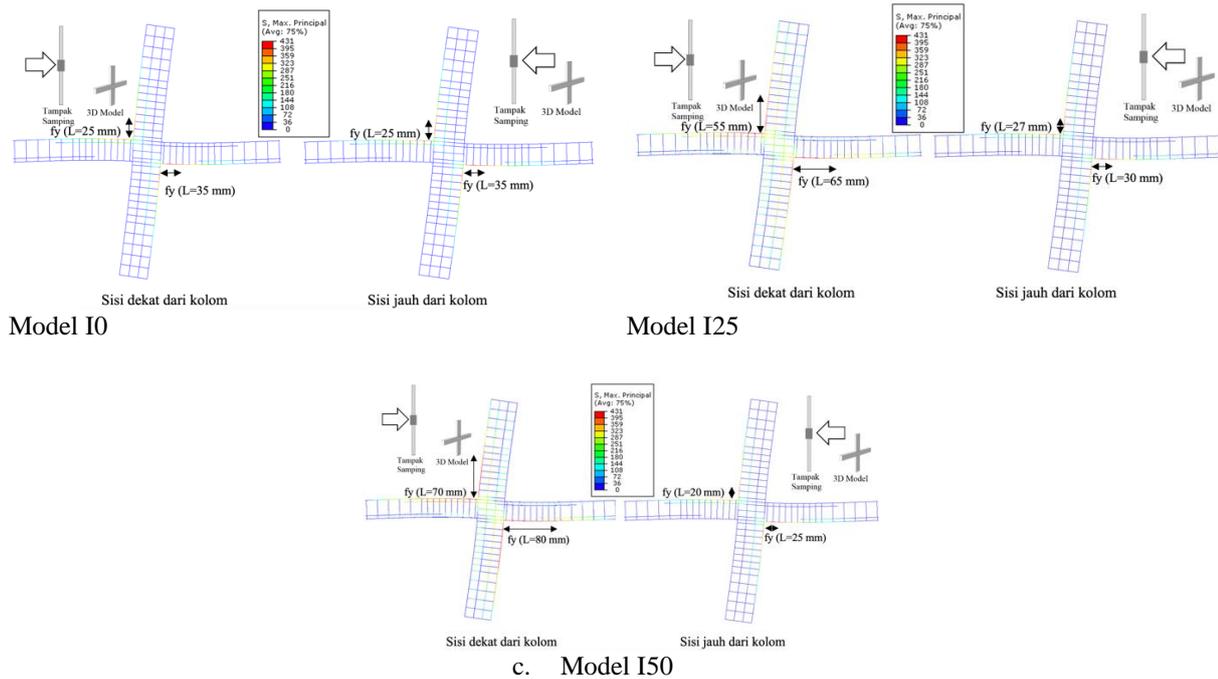
Gambar 9. Pola retak model analisis

Perbedaan ukuran retak antara sisi dekat dan jauh kolom pada model I25 dan I50 dapat dijelaskan oleh adanya beban horizontal yang diterapkan pada ujung atas dan bawah kolom. Beban ini menciptakan momen tambahan yang mempengaruhi distribusi tegangan, menyebabkan retak yang lebih besar pada sisi dekat kolom dan lebih kecil pada sisi jauh kolom. Semakin besar eksentrisitas, semakin besar pula perbedaan ukuran retak antara sisi dekat dan jauh kolom, menunjukkan distribusi tegangan yang semakin tidak merata pada struktur.

4.4 Tegangan pada Baja Tulangan

Analisis tegangan pada baja tulangan untuk ketiga model hubungan balok-kolom pipih menunjukkan pola yang konsisten dengan perilaku struktur secara keseluruhan. Pada seluruh model, tegangan maksimum yang terjadi pada tulangan tarik di daerah tumpuan balok bagian kanan mencapai nilai yang sama, yaitu 431 MPa, yang merupakan tegangan leleh baja tulangan. Pola tegangan yang terbentuk pada tulangan serupa dengan pola tegangan dan regangan pada beton, mengikuti arah kerja deformasi akibat beban horizontal yang diterapkan pada tumpuan kolom. Pada model I0 dengan eksentrisitas 0, tegangan maksimum terjadi pada jarak yang sama dari tepi kolom, yaitu 35 mm, baik pada sisi dekat maupun sisi jauh kolom. Tegangan leleh pada tulangan kolom terjadi hingga jarak 25 mm dari muka balok untuk kedua sisi. Hal ini menunjukkan distribusi tegangan yang simetris, sesuai dengan beban tanpa eksentrisitas. Model I25 mulai menunjukkan perbedaan akibat eksentrisitas balok-kolom. Meskipun tegangan maksimum tetap sama (431 MPa), posisi leleh baja berbeda antara sisi dekat dan jauh kolom. Pada sisi dekat kolom, leleh baja terjadi pada jarak 65 mm dari tepi kolom, sedangkan pada sisi jauh hanya 30 mm. Tegangan leleh pada tulangan kolom juga menunjukkan perbedaan mencapai 55 mm dari muka balok pada sisi dekat dan 27 mm pada sisi jauh. Ini mengindikasikan redistribusi tegangan akibat eksentrisitas beban. Perbedaan menjadi semakin signifikan pada model I50. Posisi leleh baja pada sisi dekat kolom terjadi pada jarak 80 mm dari tepi kolom, sementara pada sisi jauh hanya 25 mm. Tegangan leleh pada tulangan kolom mencapai 70 mm dari muka balok pada sisi dekat dan hanya 20 mm pada sisi jauh. Perbedaan ini mengilustrasikan pengaruh yang lebih besar dari eksentrisitas beban terhadap distribusi tegangan pada struktur.

Semakin besar eksentrisitas, semakin jauh posisi leleh baja dari tepi kolom pada sisi dekat, dan sebaliknya semakin dekat pada sisi jauh. Hal ini konsisten dengan observasi pada pola retak dan regangan beton, di mana eksentrisitas yang lebih besar menyebabkan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi pada sisi dekat kolom.



c. Model I50
Gambar 10. Posisi leleh baja (3D model)

4.5 Drift Rasio dan Daktilitas

Drift rasio yang dihitung sebagai rasio simpangan pada ujung kolom terhadap tinggi kolom, menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya eksentrisitas balok-kolom. Seperti ditunjukkan pada Tabel 9, Model I0 dengan eksentrisitas 0 memiliki *drift* rasio 9,39%, sementara model I25 dan I50 menunjukkan peningkatan menjadi 10,79% dan 11,24% secara berurutan. Meskipun semua model telah melampaui batas *drift* 2% yang ditetapkan oleh SNI 1726:2002 untuk struktur tahan gempa, peningkatan *drift* rasio pada model dengan eksentrisitas yang lebih besar mengindikasikan bahwa struktur menjadi lebih fleksibel. Hal ini menunjukkan bahwa eksentrisitas balok-kolom memiliki pengaruh signifikan terhadap deformabilitas struktur.

Tabel 9 Perbandingan *drift* rasio

Model	Simpangan (mm)	Tinggi (mm)	<i>Drift</i> rasio (%)
I0	145.57	1550	9.39
I25	167.32	1550	10.79
I50	174.28	1550	11.24

Dalam hal daktilitas seperti ditunjukkan pada Tabel 10, semua model menunjukkan tingkat daktilitas parsial sesuai dengan kriteria SNI 1726:2002, dengan nilai daktilitas berada dalam rentang $1,5 < \mu < 5,3$. Model I0 memiliki daktilitas 4,16, sementara model I25 dan I50 menunjukkan peningkatan menjadi 4,66 dan 4,82 secara berurutan. Peningkatan daktilitas ini mengindikasikan bahwa struktur dengan eksentrisitas yang lebih besar memiliki kemampuan yang lebih baik untuk berdeformasi secara inelastis setelah mencapai kondisi leleh. Menariknya, meskipun *drift* rasio meningkat dengan bertambahnya eksentrisitas, yang biasanya mengindikasikan penurunan kekakuan struktur, daktilitas struktur juga meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa eksentrisitas balok-kolom tidak hanya mempengaruhi fleksibilitas struktur, tetapi juga meningkatkan kemampuannya untuk menyerap energi melalui deformasi inelastis.

Tabel 10 Perbandingan daktilitas

Model Struktur	Rotasi Kondisi Ultimit (°)	Rotasi Kondisi Leleh (°)	Daktilitas Struktur (μ)	Tingkat Daktilitas
I0	2.04	0.49	4.16	Parsial
I25	2.98	0.64	4.66	Parsial
I50	3.42	0.71	4.82	Parsial

5. KESIMPULAN

Studi pemodelan numerik pada pertemuan balok-kolom pipih beton bertulang dengan variasi eksentrisitas (0 mm, 25 mm, dan 50 mm) menunjukkan pengaruh signifikan terhadap kinerja struktur. Kapasitas beban maksimum menurun dari 233,82 kN ($e=0$ mm) menjadi 218,70 kN ($e=50$ mm), sementara deformasi maksimum meningkat dari 145,57 mm menjadi 174,28 mm. Pola retak menjadi semakin asimetris, dengan ukuran retak pada sisi dekat kolom mencapai 480 x 370 mm untuk eksentrisitas 50 mm. Tegangan leleh baja tulangan tetap konsisten pada 431 MPa, namun posisinya bervariasi tergantung eksentrisitas. *Drift* rasio meningkat dari 9,39% ($e=0$ mm) menjadi 11,24% ($e=50$ mm), melebihi batas 2% SNI 1726:2002. Daktilitas struktur juga meningkat dari 4,16 menjadi 4,82, menunjukkan peningkatan kemampuan menyerap energi. Hasil ini menyoroti kompleksitas perilaku struktur dengan eksentrisitas balok-kolom pipih, dimana penurunan kapasitas beban diimbangi dengan peningkatan fleksibilitas dan daktilitas. Temuan ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik untuk desain struktur beton bertulang dengan konfigurasi balok-kolom pipih eksentris, terutama dalam konteks ketahanan gempa, meski memerlukan pertimbangan khusus terkait tingginya *drift* rasio yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Genikomsou, A.S. & Polak, M.A., 2014. Finite Element Analysis of a Reinforced Concrete Slab-Column Connection using ABAQUS. Structures Congress 2014, pp.813–823.
- ABAQUS Manual , 2016. ABAQUS/CAE User's Manual. U.S.A.: ABAQUS.
- Hegger., Josef, Sherif., Alaa, and Roeser., Wolfgang. 2004. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections. ACI Structural Journal, September-October, Title no. 101-S59, Hal: 604-614.
- Kmiecik, P. & Kaminski, M., 2011. Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation taken into Consideration. Civil and Mechanical Engineering, XI(3).
- LaFave., James M, et al. 2005. Eccentric Beam-Column Connections (Performance and Design of Joints Subjected to Seismic Lateral Load Reversals). Concrete International, September.
- Lee., Hung-Jen, and Ko., Jen-wen. 2007. Eccentric Reinforced Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Loading in Principal Directions. ACI Structural Journal, July-August, Title no. 104-S44, Hal: 459-467.
- Quintero-Febres., Charlos G and Wight., James K. 2001. Experimental Study of Reinforced Concrete Interior Wide Beam-Column Connections Subjected to Lateral Loading. ACI Structural Journal, July-August, Title no. 98-S55, Hal: 572-582.
- Shin., Myoungsu and LaFave., James M. 2004. Seismic Performance of Reinforced Concrete Eccentric Beam-Column Connections with Floor Slabs. ACI Structural Journal, May-June, Title no. 101-S41, Hal: 403-412.
- SNI 1726, 2012. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung Badan Standardisasi Nasional, ed., Jakarta: Manggala Wanabakti.
- SNI 1727, 2013. Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain Badan Standardisasi Nasional, ed., Jakarta: Manggala Wanabakti.
- SNI 2847, 2013. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung Badan Standardisasi Nasional, ed., Jakarta: Manggala Wanabakti.
- Stehle., John S, et al., 2001. Reinforced Concrete Interior Wide-Band Beam Column Connections Subjected to Lateral Earthquake Loading. ACI Structural Journal, May-June, Title no. 98-S26, Hal: 270-279.
- Thanukumari, B. and Perumal, P. "An Experimental Study on the Behaviour of M20 Concrete with Cocktail Fibre in Exterior Beam- Column Joints Subjected to Reversed Cyclic Loading", IETECH Journal of Civil and Structures, Vol. 2, No. 2, pp. 065-070, 2009.
- Thanukumari, B. and Perumal, P. "Behaviour of M60 Concrete Using Fibre Cocktail in Exterior Beam-Column Joint Under Reversed Cyclic Loading", Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing) Vol. 11, No. 2, pp. 265-275, 2010.
- Thanukumari, B. and Perumal, P. "Use of Fibre Cocktails to Increase the Seismic Performance of Beam-Column Joints", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, No. 9, pp. 3997-4006, 2010.